環境省　環境研究総合推進費
研究課題番号　2-1804
体系的番号　JPMEER20182004

2050年の社会像を見据えた再生可能エネルギー利用拡大への道筋

研究実施期間　平成30年度～令和2年度

重点課題　主：【重点課題⑤】低炭素で気候変動に柔軟に対応する持続可能なシナリオづくり
　　副：【重点課題⑥】気候変動の緩和策に係わる研究・技術開発

研究代表者　　横浜国立大学　本藤祐樹

研究代表機関　横浜国立大学
研究分担機関　産業技術総合研究所

1. 本研究の背景

パリ協定： 低炭素社会そして脱炭素社会の実現

- 2030年度に温室効果ガス26%削減、今世紀後半を展望した長期戦略提出の招請
- エネルギー部門の大きな変化が求められ、**再生可能エネルギーの大幅な利用拡大が不可欠**である

地域循環共生圏： 地域特性を生かした持続可能な経済の実現

- 地域資源（自然、社会、文化など）の活用による地域経済の強靭化
- 化石燃料の燃焼によるCO_2の削減に加えて、**地域資源のひとつである再エネを用いた地域の活力の維持・発展**が望まれる

↓

「全国一律」「導入量拡大」から**「地域特性」「効果最大化」**に軸足を移した
再生可能エネルギー普及政策・施策の立案

↓

中長期の再生可能エネルギー普及に関する詳細な分析が不可欠

2. 研究目的

2050年の再生可能エネルギー大量普及社会の構築に向けた潜在的な道筋を明らかにする

中期的には（2030年）、再エネ技術の導入によるCO_2削減や雇用創出の効果を**産業連関モデル**に基づき評価し、**フォアキャスティング**で費用対効果の高い再エネ利用方策について検討 ⇨ サブテーマ1

長期的には（2050年）、CO_2大幅削減を可能とする再エネを中心としたエネルギーシステムの姿を**エネルギーモデル**により描出し、**バックキャスティング**でエネルギーインフラの方向性を検討 ⇨ サブテーマ2

着眼点1: 幅広く再エネ（再エネ直接熱利用、海洋再エネ）の可能性を考える
着眼点2: 再エネのコベネフィットとして地方部の雇用機会を考える

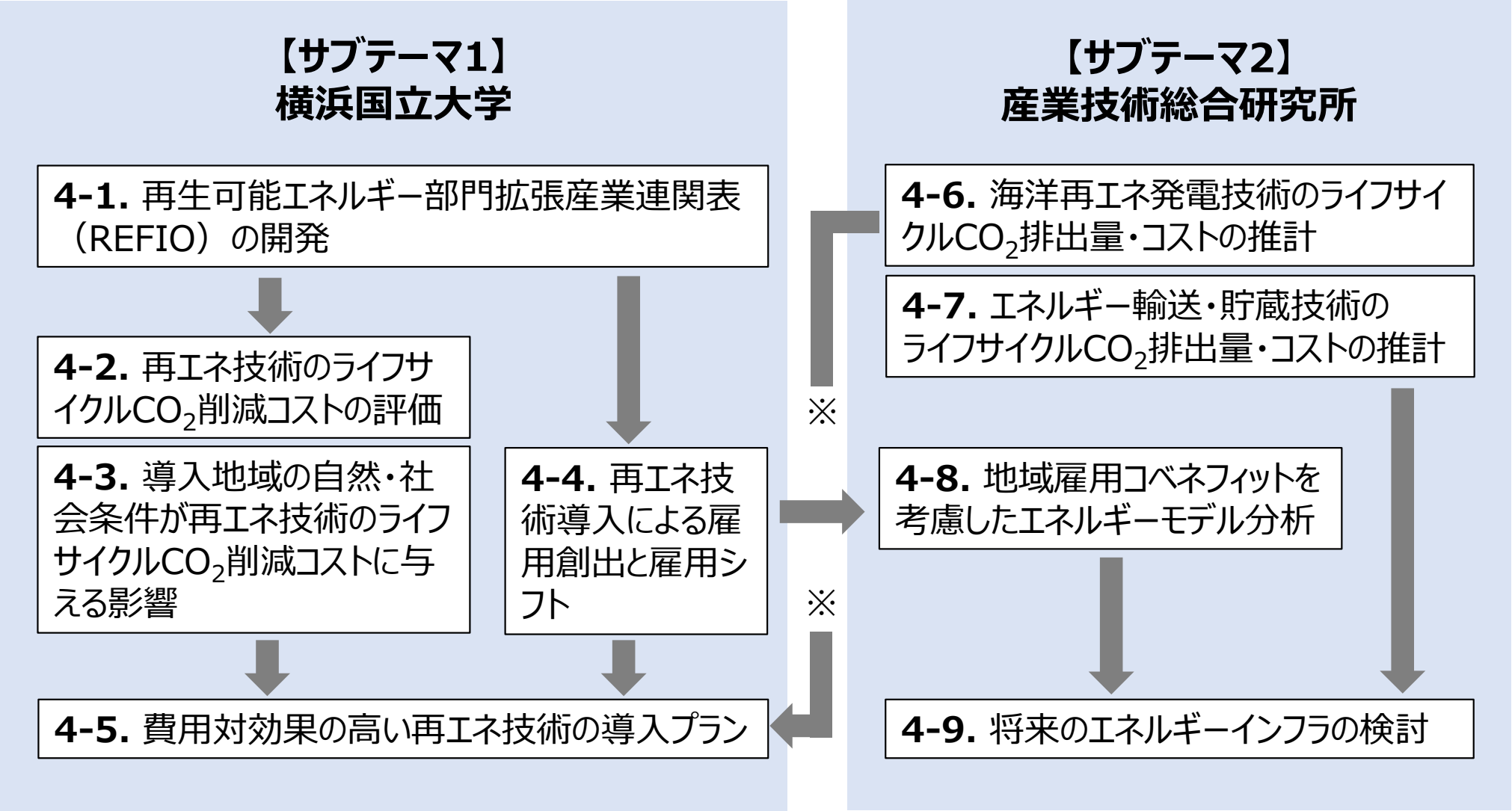
3. 研究目標(1/2)

全体目標	再生可能エネルギー（以下、再エネ）技術の導入がもたらすコベネフィットも考慮して、中長期にわたる各技術の最適な導入のあり方を明らかにし（下記のサブテーマ1と2における具体的な推計結果に基づき）、我が国における将来の再生可能エネルギー大量普及社会の構築に向けた潜在的な道筋を示す。
サブテーマ1	CO_2削減量や雇用創出などの観点から効果的な再エネ技術の導入のあり方を、各技術の特性および導入される地域の特性を考慮して、フォアキャストにより定量的に明らかにする。具体的には、第一に、熱技術等を新たなオプションとして加え、再エネ導入効果の定量分析を可能とする再生可能エネルギー部門拡張産業連関表を拡充する。その上で、第二に、再エネを用いた発電技術（太陽光、風力等）だけではなく、熱生産技術（バイオ熱、地中熱等）も取り上げ、各技術のライフサイクルCO_2削減コストを明らかにする。第三に、再エネ技術が導入されることで生じ得るコベネフィットとして、地域における雇用の創出やシフト、関連産業の創出などの可能性を明らかにする。第四に、地域の自然・社会特性に応じた、費用対効果の高い再エネ技術の導入プランを明らかにする。

3. 研究目標(1/2)

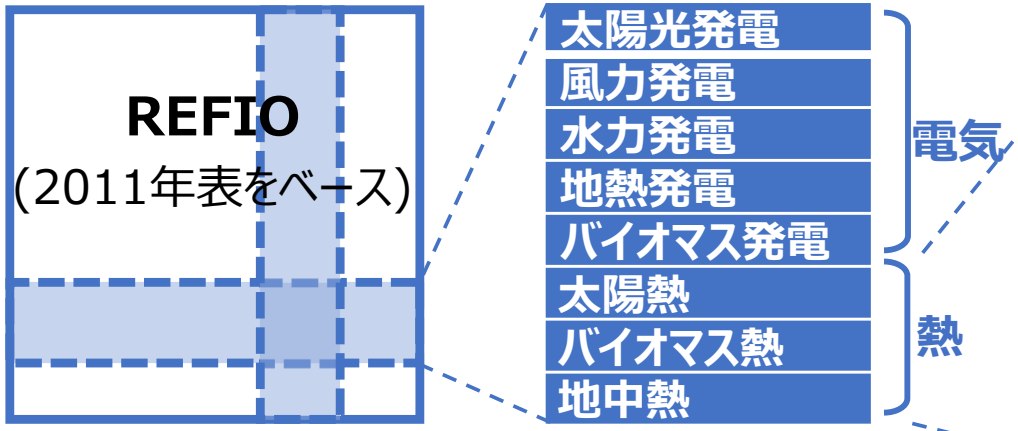
サブテーマ2	2050年までを対象に複数のシナリオに基づいて、再エネの大量導入によってCO_2排出量大幅削減を実現可能なエネルギーシステム像に関する定量的情報を、バックキャストにより示す。具体的には、第一に、海洋再エネ技術とエネルギー輸送・貯蔵技術を対象として、実用段階におけるライフサイクルCO_2排出量ならびにコストを算出する。第二に、将来の技術開発や社会状況の変化、ならびに、コベネフィットを考慮して、2050年までにCO_2排出量大幅（80%）削減可能な地域別の再エネ供給パターン・エネルギー需要パターンを複数提示する。第三に、エネルギー需要パターンと再エネを含めたエネルギー供給パターンを満たし、かつCO_2排出量大幅削減可能なエネルギー輸送・貯蔵技術の最適な組み合わせを明らかにし、将来のエネルギーインフラの姿を提示する。

4. 研究開発内容


【サブテーマ1】
横浜国立大学
4-1. 再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO）の開発
4-2. 再エネ技術のライフサイクルCO_2削減コストの評価
4-3. 導入地域の自然・社会条件が再エネ技術のライフサイクルCO_2削減コストに与える影響
4-4. 再エネ技術導入による雇用創出と雇用シフト
4-5. 費用対効果の高い再エネ技術の導入プラン
※
※
【サブテーマ2】
産業技術総合研究所
4-6. 海洋再エネ発電技術のライフサイクルCO_2排出量・コストの推計
4-7. エネルギー輸送・貯蔵技術のライフサイクルCO_2排出量・コストの推計
4-8. 地域雇用コベネフィットを考慮したエネルギーモデル分析
4-9. 将来のエネルギーインフラの検討

5-1. 成果の概要【サブテーマ1】
5-1.1 再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO）の開発

- 発電技術に加えて、**8種の再エネ熱利用技術（給湯、空調）**を追加
- 13種の技術（再エネ8種、従来5種）に対して、機器製造、建設（機器設置）、運用、燃料製造の各段階に関する**37部門**を新たに作成
  - 建設部門： 複数のデータを用いて大まかな費用構成を推計した上で、事業者から得た工事設計図書等を用いて詳細なコスト項目へ分割 ⇒ 一般性の高い投入係数の作成が可能
  - 運用部門： 給湯・空調負荷とエネルギー消費量の推計に、熱負荷・エネルギー消費推計ソフトウェアを利用 ⇒ 各地域の熱供給の特性を考慮して全国集計することが可能



再エネ熱 8種	従来熱 5種
太陽熱温水器(自然循環)	ガス給湯器
ソーラーシステム(強制循環)	
地中熱ヒートポンプ(中央)	ウォーターチリングユニット
地中熱ヒートポンプ(個別)	パッケージエアコン
木質チップボイラー(給湯)	温水発生器
木質ペレットボイラー(給湯)	
木質チップボイラー(空調)	吸収式冷温水器
木質ペレットボイラー(空調)	

REFIO: **R**enewable **E**nergy-**F**ocused **I**nput-**O**utput Table

5-1. 成果の概要【サブテーマ1】
5-1.2 再エネ技術のライフサイクルCO_2削減コストの評価

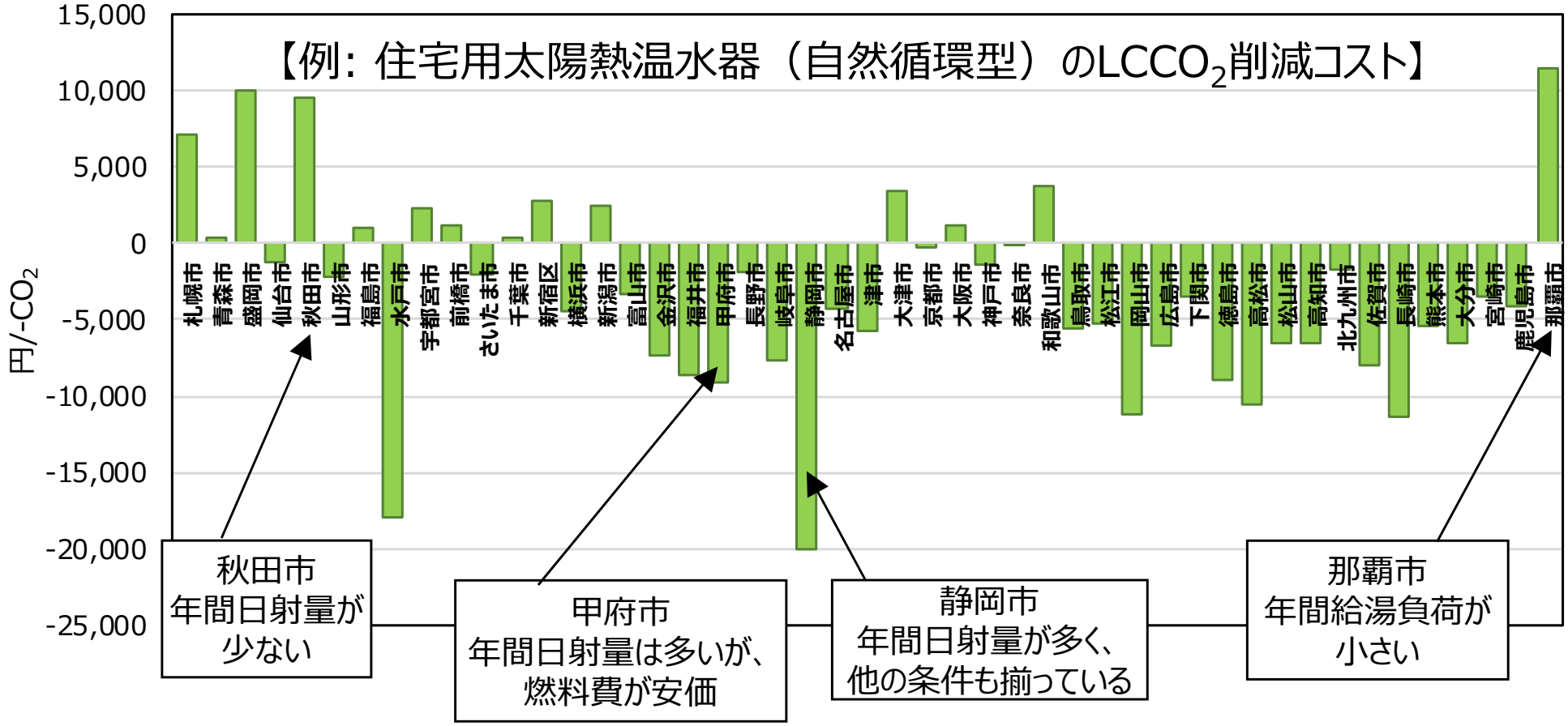
- REFIOを用いて**20種**の再エネ技術（**発電、給湯、空調**）の**LC-CO_2削減コスト**（日本の平均的な条件下）を試算
  - 発電: 系統電力をベースラインとして削減コストを評価
  - 給湯・空調: 既設の従来型給湯・空調設備の代替を想定して削減コストを評価（例：太陽熱温水器の場合は、その導入によって代替されるガス給湯器による給湯をベースライン）

$$\textbf{LCCO}_2\textbf{削減コスト} = \frac{\textbf{再エネ導入による増加コスト}}{\textbf{再エネ導入によるCO}_2\textbf{削減量}}$$

- 再エネ直接熱利用技術（給湯、空調）のLC-CO_2削減コストの特徴
  - 給湯利用技術（太陽熱温水器、ソーラーシステム、木質チップ、木質ペレット）
    - ✓ 年間を通して給湯需要が安定して存在するため、4種の技術ともLC-CO_2削減コストが小さく、費用対効果の高い脱炭素オプション
    - ✓ 太陽熱温水器と木質ペレット（給湯）は、CO_2とコストの同時削減の可能性
  - 空調利用技術（地中熱HP（チラー）、地中熱HP（ビルマル）、木質チップ、木質ペレット）
    - ✓ 年間の設備利用率が低く、4種の技術ともLC-CO_2削減コストが10万円/t-CO_2を超え、費用対効果の点で不利
    - ✓ ただし、導入条件によってはLC-CO_2削減コストが数千円/t-CO_2となるケースも存在

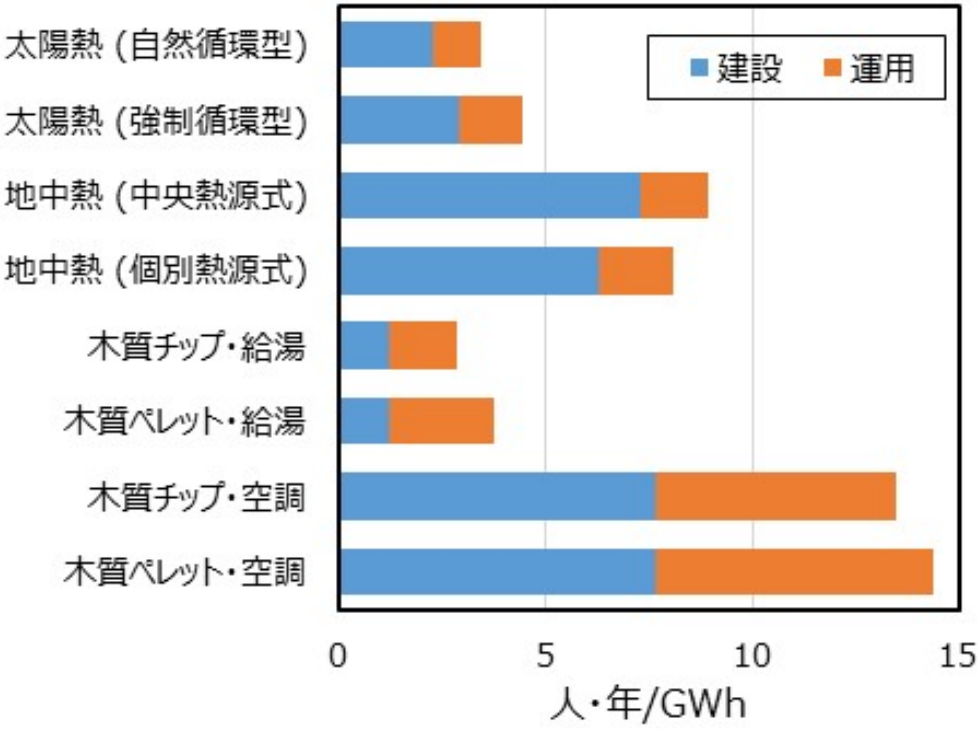
5-1. 成果の概要【サブテーマ1】
5-1.3 導入条件が再エネ技術のLC-CO_2削減コストに与える影響

- 日射量や気温などの**自然条件**、既存の給湯・空調機器の種類やエネルギー価格などの**社会条件**を考慮し、導入地域別に**LC-CO_2削減コスト**を試算
- 太陽熱（自然循環、強制循環）、地中熱ヒートポンプ（中央熱源、個別熱源）、木質バイオマス熱（チップ、ペレット）を対象

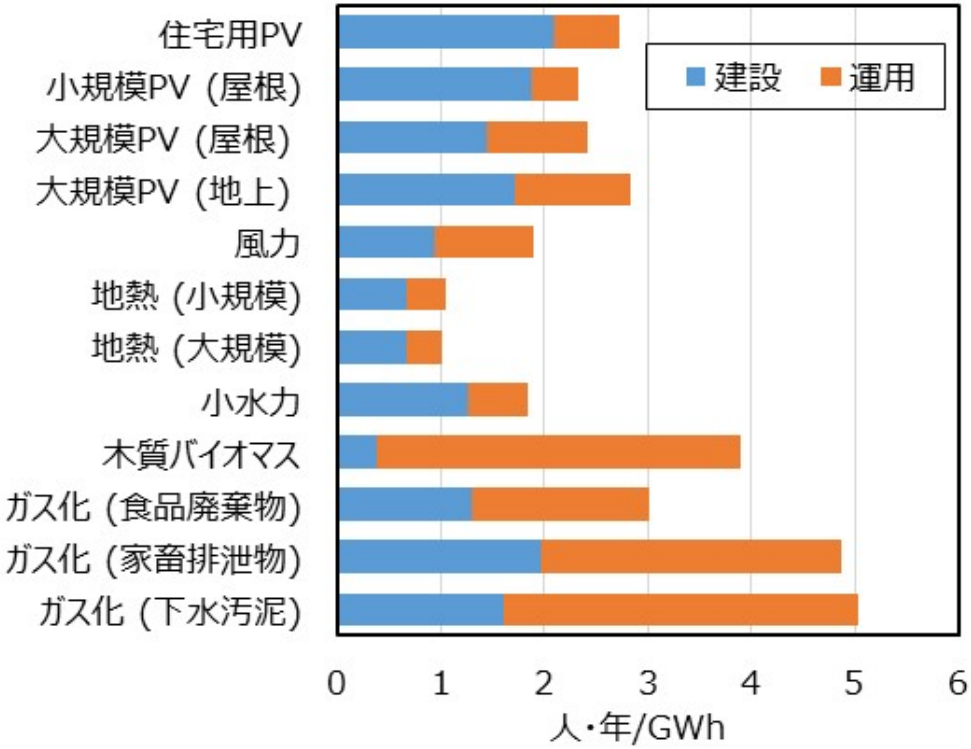


5-1. 成果の概要【サブテーマ1】
5-1.4 再エネ技術導入による雇用創出と雇用シフト

- 太陽熱（自然循環、強制循環）、地中熱ヒートポンプ（中央熱源、個別熱源）、木質バイオマス熱（チップ、ペレット）を対象に、**LC-雇用創出ポテンシャル**を評価
- 直接熱利用技術の導入にともなう雇用シフト（雇用機会の増加と減少）を産業部門別に推計



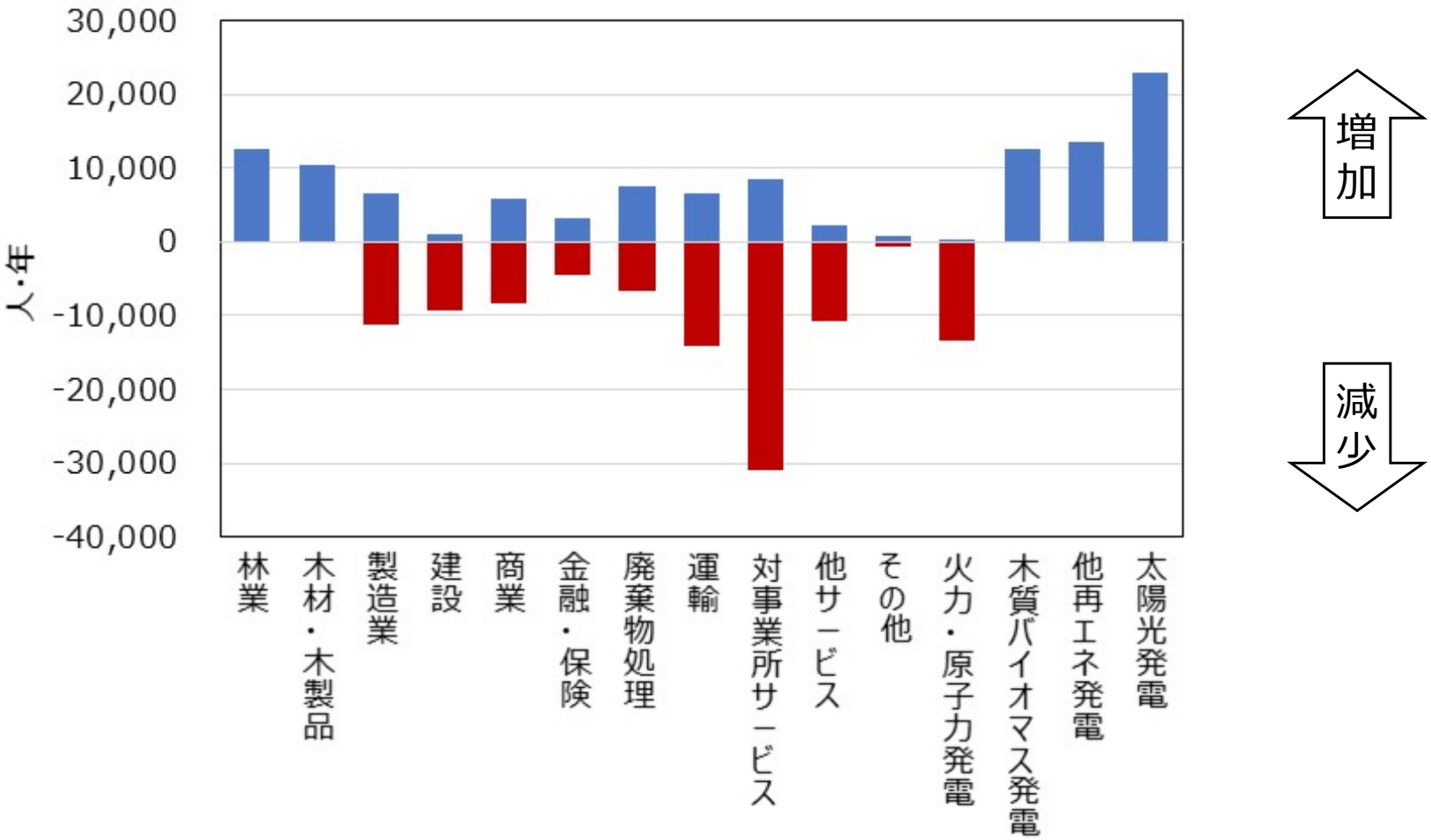
【直接熱利用技術のLC-雇用創出ポテンシャル】



【発電技術のLC-雇用創出ポテンシャル（参考）】

5-1. 成果の概要【サブテーマ1】
5-1.4 再エネ技術導入による雇用創出と雇用シフト

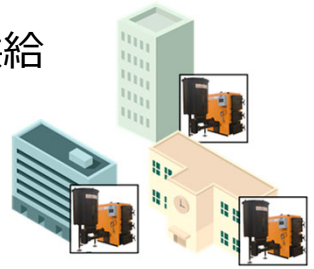
- **再エネ発電**技術を対象に電源構成の変化に伴う**雇用シフト**について分析
  - 雇用の総量だけではなく、国内外の如何なる産業で、如何なる職種の雇用が増減するのか
- 経済産業省の長期エネルギー需給見通しにおける2030年の電源構成を想定し、2016年度から2030年度までの**電源構成の変化により生じる雇用の増減を部門別**に試算



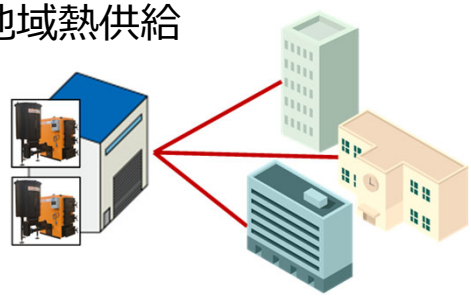
5-1. 成果の概要【サブテーマ1】
5-1.5 費用対効果の高い再エネ技術の導入プラン

- 地域熱供給の可能性を探るための評価モデルを開発
- 中山間地域等における需要家群を想定し、木質チップボイラーによる**個別熱供給と地域熱供給のLC-CO_2削減コスト**を試算（従来システムとして重油ボイラーを想定）
- 木質チップの供給が比較的容易な**中山間地等におけるコンパクト、かつ、小さな需要家の集合体**においては、地域熱供給のメリットがデメリットを上回る可能性

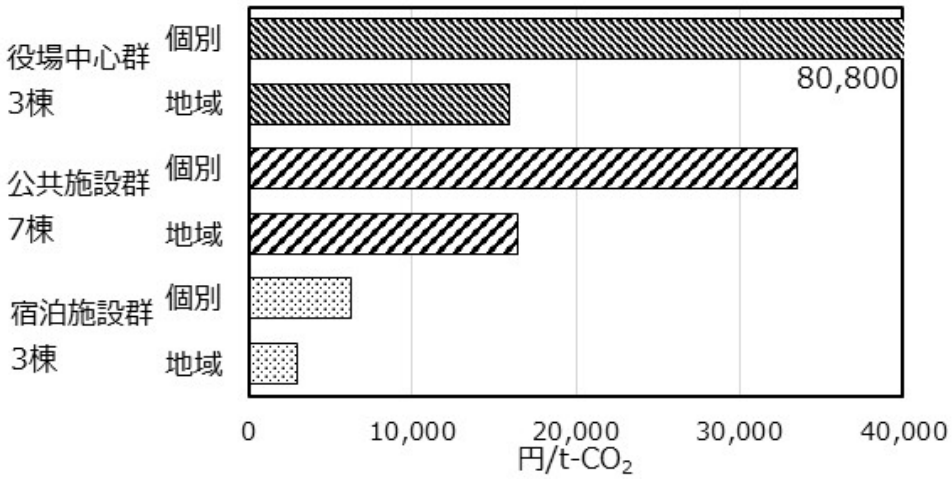
個別熱供給



地域熱供給

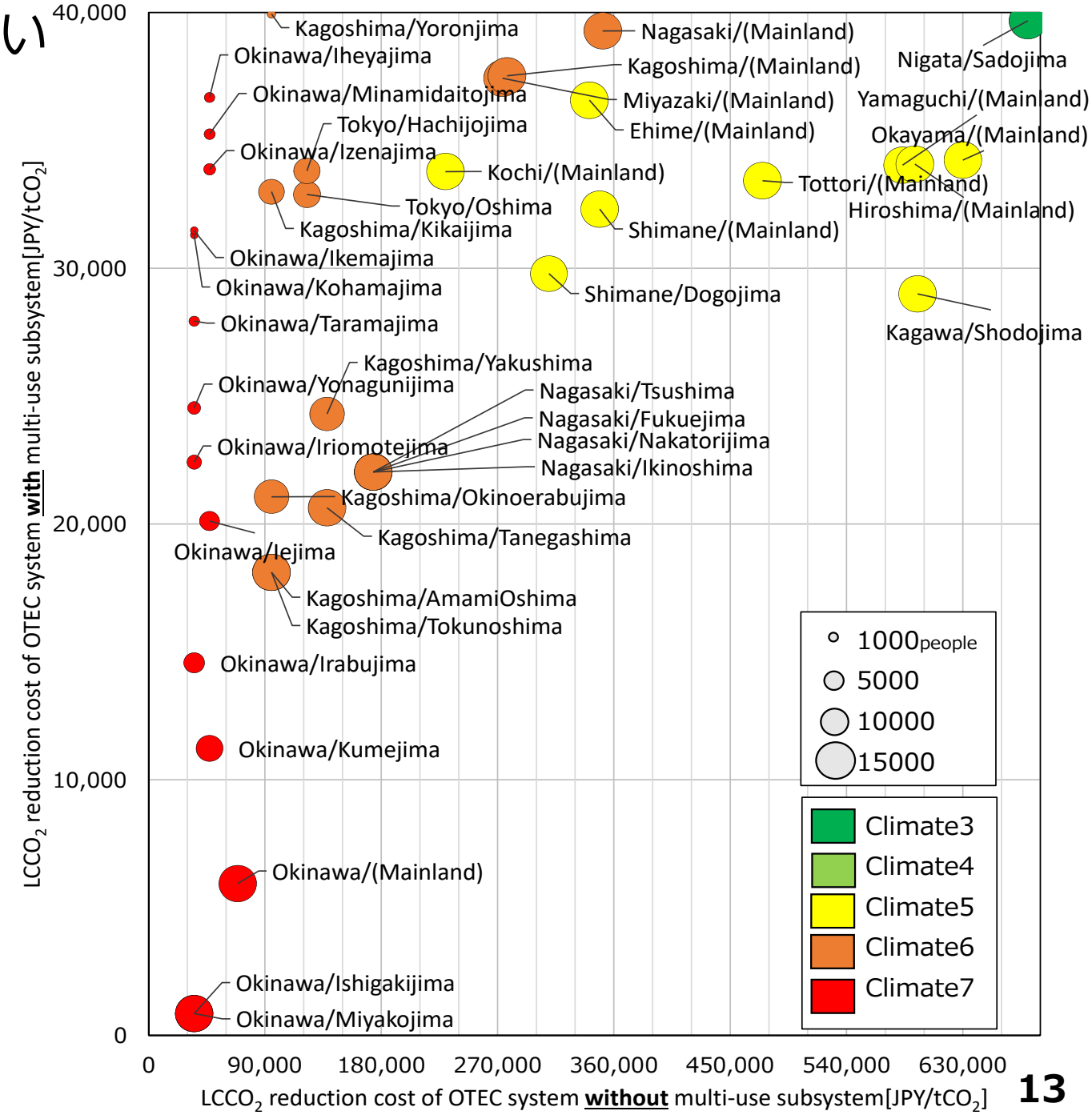


	需要家（延床面積）		総配管長
役場中心群	役場（2,000 m^2）	小学校（2,000 m^2）	600 m
	図書館（1,000 m^2）		
公共施設群	役場（4,000 m^2）	中学校（4,000 m^2）	1,600 m
	小学校（4,000 m^2）	幼稚園（500 m^2）	
	郵便局（500 m^2）	病院（4,000 m^2）	
	福祉施設（2,000 m^2）		
宿泊施設群	ホテル（4,000 m^2）× 3		600 m



5-1. 成果の概要【サブテーマ1】
5-1.5 費用対効果の高い再エネ技術の導入プラン

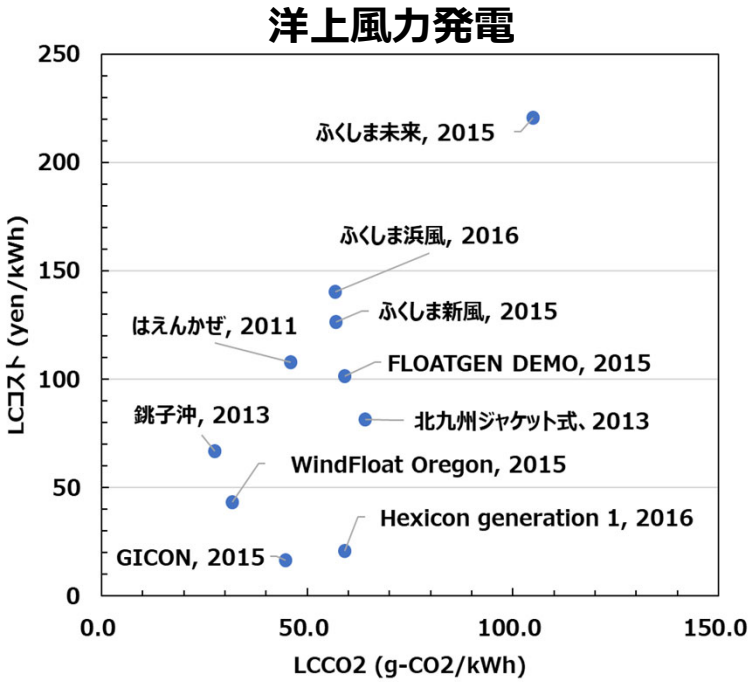
- 海洋深層水を**複合利用する場合（発電と冷熱）としない場合（発電のみ）のLC-CO_2削減コスト**を試算
  - 複合システムでは、冷熱を建物空調と土壌冷却に利用
- 海洋深層水を発電だけではなく冷熱源としても利用することで、OTECが**離島などにおける地域エネルギーシステムの中心**として機能する可能性
- 養殖などに利用することで、さらに費用対効果の高い脱炭素オプション

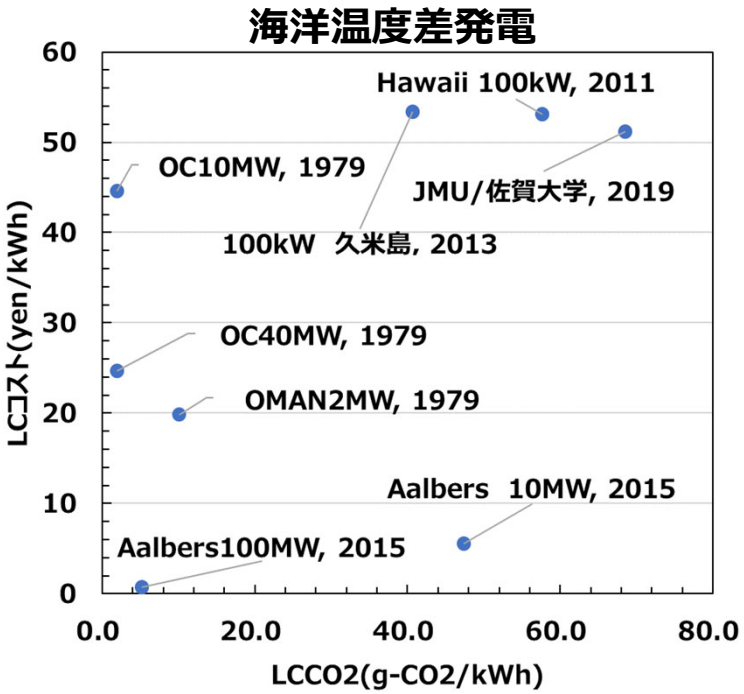


5-1. 成果の概要【サブテーマ2】
5-1.6 海洋再エネ発電技術のライフサイクルCO_2排出量・コストの推計

- 5種の海洋再エネ発電を対象に、文献調査（論文、環境省・NEDO・文科省等の報告書）、ヒアリング調査（設計図等の入手）に基づき、LC-CO_2とLC-コストを試算

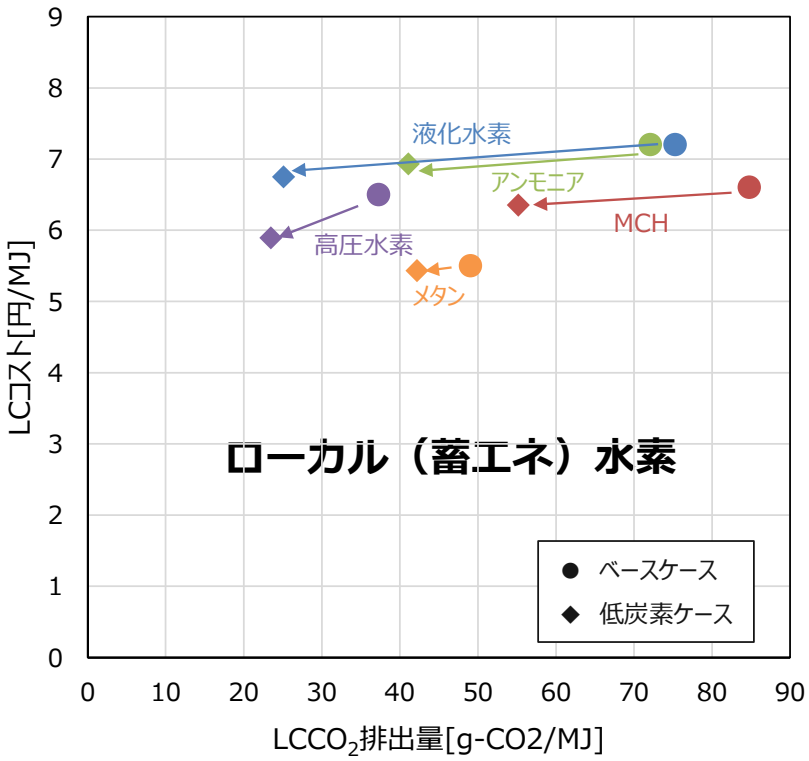
発電技術	地域	評価対象
洋上風力発電	国内	浮体式(4ケース)，ジャケット式(1ケース)，着床式(1ケース)
	海外	浮体式(4ケース)
波力発電	国内	振動水柱型(4ケース)，可動物体型(1ケース)，超波型(1ケース)
	海外	振動水柱型(1ケース)
潮力発電	海外	潮力発電(5ケース)
潮流・海流発電	国内	橋脚利用式(1ケース)，油圧式(1ケース)，垂直軸直線翼式(1ケース)，橋脚･港湾構造物利用式(1ケース)
海洋温度差発電	国内	陸上設置型(1ケース)，洋上設置型(1ケース)
	海外	陸上設置型(6ケース)



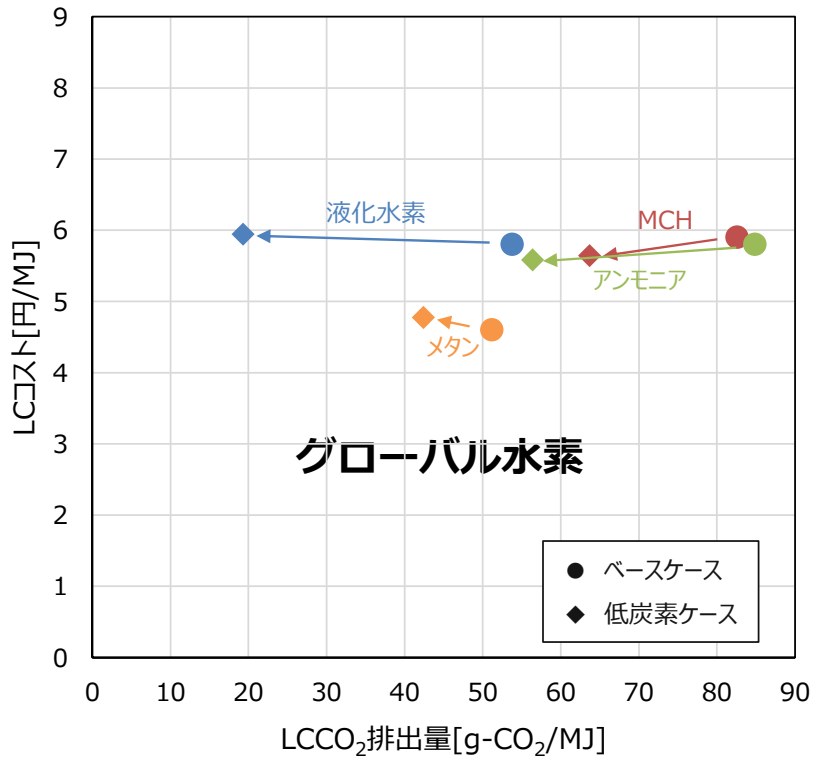


5-1. 成果の概要【サブテーマ2】
5-1.7 エネルギー輸送・貯蔵技術のライフサイクルCO_2排出量・コストの推計

- エネルギー輸送・貯蔵としての水素を類型化し、両タイプのLC-CO_2とLC-コストを試算
  - **グローバル水素**：GHG削減のためにエネルギー資源をグローバルに有効活用
  - **ローカル（蓄エネ）水素**：変動型再エネを大量利用する際の電力平準化・蓄エネのオプション



再エネ電力証書で購入したPV電力を用いた水電解によって水素を製造し、エネルギーキャリアに変換した後、需要地まで輸送し、既存産業において利用



中東（UAE）のPV電力を用いた水電解によって水素を製造し、エネルギーキャリアに変換した後、日本まで船舶輸送し、燃焼用燃料として利用

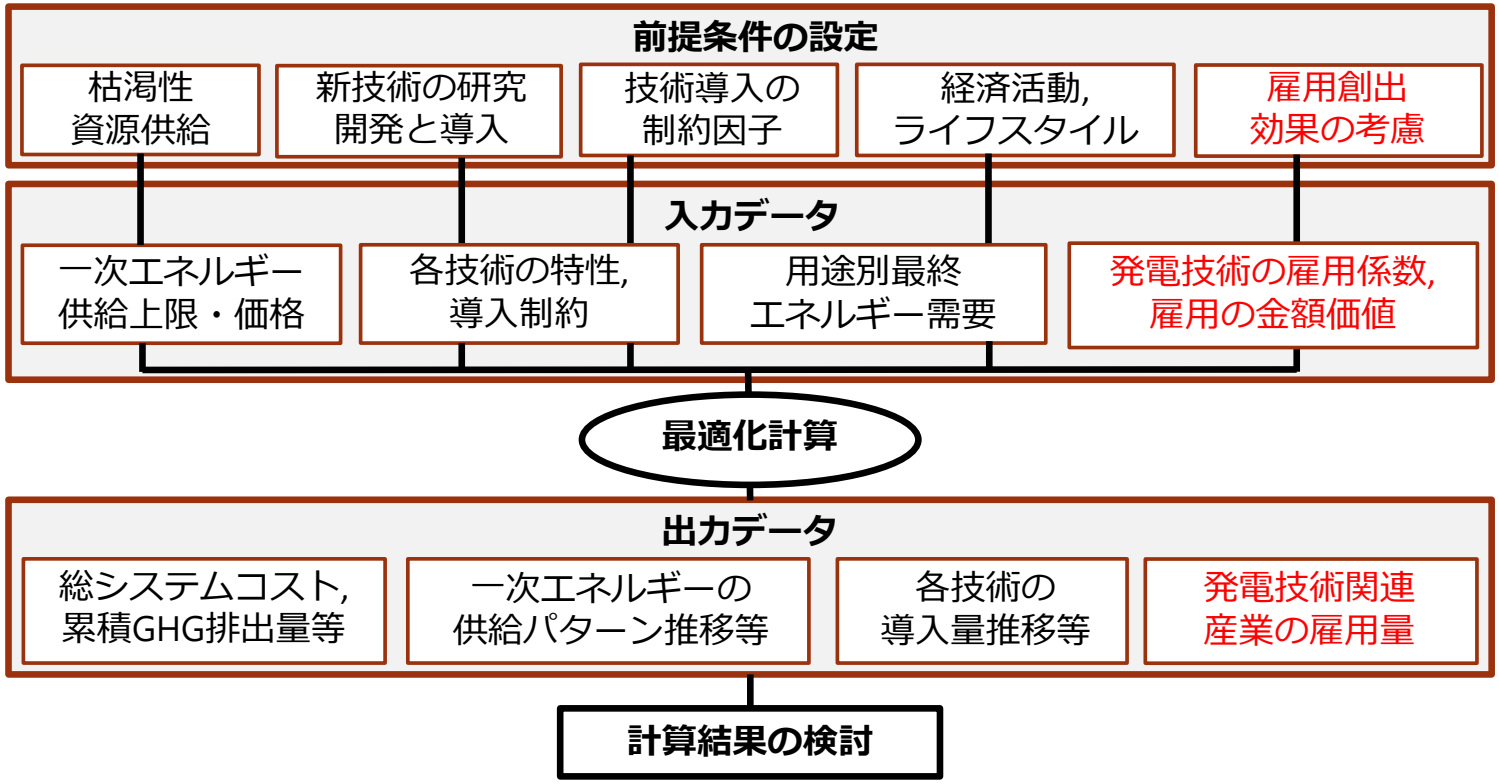
5-1. 成果の概要【サブテーマ2】
5-1.8 地域雇用コベネフィットを考慮したエネルギーモデル分析

- 産総研の多地域MARKALモデル
  - 目的関数：分析対象期間の総システムコストの最小化
  - 制約条件：①エネルギーシステムの構造による制約、②その他の制約
  - 分析期間：2010年～2050年（5年を1期）
  - 1期における時間帯数：6（夏・冬・中間期×昼・夜）
  - 地域分割区分：47の「都道府県地域」、10の「電力地域」、1つの「国地域」の 3種類、計58区分

総システムコスト

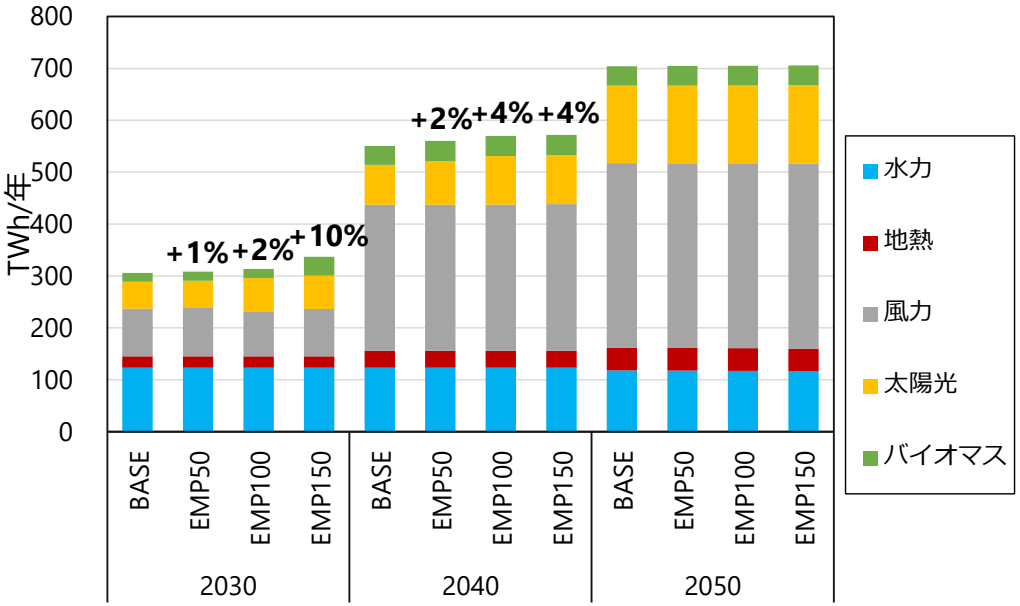
＝ 一次エネルギー資源の調達コスト
＋ 技術の建設・運用コスト
＋ 技術の最終期の残存価値
－ 建設時雇用の金額価値
－ 運用時雇用の金額価値

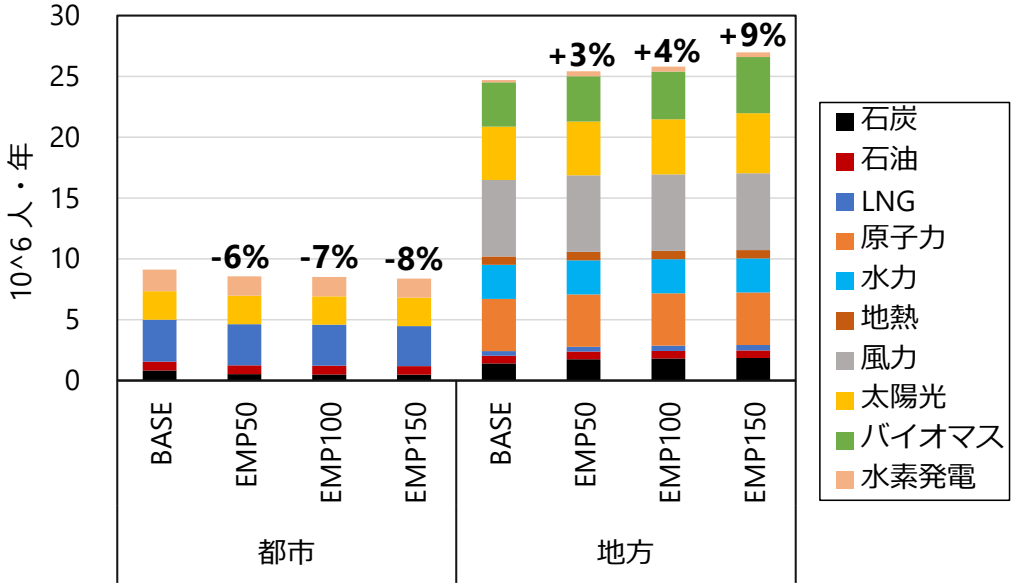
標準的なMARKALモデルの目的関数に再エネ発電施設の建設と運用に伴い発生する雇用の金額価値を追加



5-1. 成果の概要【サブテーマ2】
5-1.8 地域雇用コベネフィットを考慮したエネルギーモデル分析

- 各発電技術の増加・減少によって生じる都市部と地方部の雇用創出機会の変化を考慮
- 地方部における雇用創出（＝コベネフィット）を金額価値換算
  - 雇用量の金額価値を0～150万円/人・年（Base～EMP150）と幅をもたせて分析





【各ケース（Base～EMP150）の再エネ発電量】

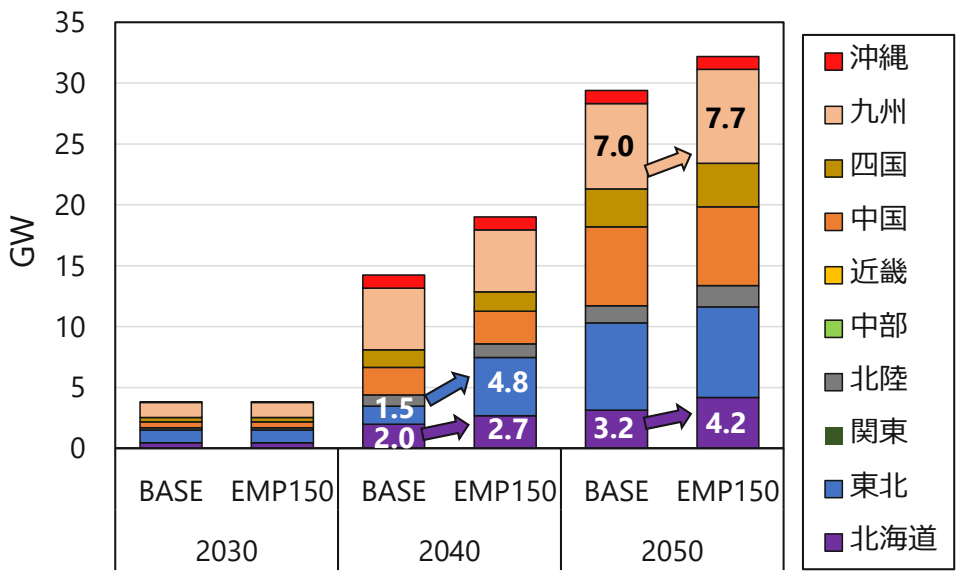
コベネフィットを考慮することで、再エネ発電の早期導入を促進（太陽光、バイオマス）

【各ケース（Base～EMP150）の累積雇用量】

コベネフィットを考慮することで、地方部の雇用は増大し、都市部の雇用は減少

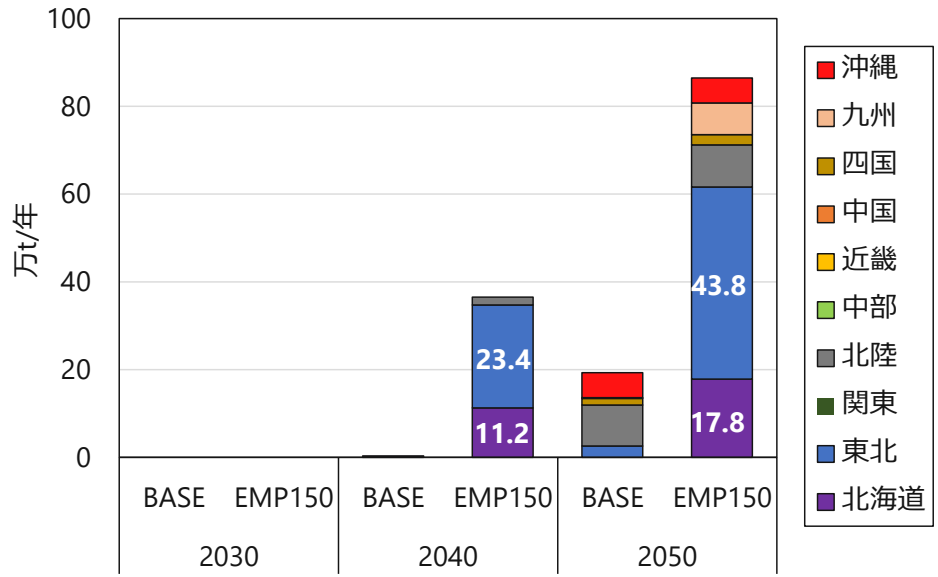
5-1. 成果の概要【サブテーマ2】
5-1.8 地域雇用コベネフィットを考慮したエネルギーモデル分析

- 蓄電池利用もしくは国内水素製造のプロセスを追加して蓄エネを考慮
  - 蓄電池はリチウムイオン電池を想定
  - 国内水素製造は、天然ガス改質と再エネ・水電解（大規模・アルカリ、オンサイト・PEM型）を想定
- 調整力電源シェアの制約、変動再エネ（太陽光・風力）蓄電池併設の制約を追加



【地域雇用ベネフィットの有無による蓄電池容量の違い】

コベネフィットを考慮することで、蓄電池容量の増加（2050年では、北海道と九州の伸び率が大きい）



【地域雇用ベネフィットの有無による再エネ・水電解による水素製造量の違い】

コベネフィットを考慮することで、水素製造量は4倍以上増大（2040年・2050年では、北海道と東北の伸び率が大きい）

5-1. 成果の概要【サブテーマ2】
5-1.9 将来のエネルギーインフラの検討

- 再エネを中心とした将来の発電インフラ
  - 地域雇用コベネフィットを考慮することで、2030～2040年にかけて再エネ発電（太陽光、バイオマス）の導入が加速
  - 地域雇用コベネフィットの価値を取り込むと、取り込まない場合と比べ、2010～2050年の40年間に日本全体で154万人・年の雇用機会が追加的に創出されると同時に、雇用機会が国外から国内へ、都市から地方へと還流
- 再エネ発電導入のための将来の電力・水素インフラ
  - 地域雇用ベネフィットを考慮すると、2050年に導入される蓄電池容量（32.2GW）は、考慮しない場合に比べて1.1倍
  - 地域雇用ベネフィットを考慮すると、2050年に導入される国内水素製造量（86.5万t）は、考慮しない場合に比べて4.4倍
  - 2050年における国内水素製造（ローカル（蓄エネ）水素）の規模は、輸入水素（グローバル水素）の3.1%と小さく、導入有利な地域（北海道、東北）にコンパクトな水素ネットワークを導入することが効果的な可能性
  - 再エネ発電の急峻な出力変動に対応できる水電解装置の開発や、製造した水素を地域で利用するための需要喚起に関する制度構築（FCV用水素ステーションの誘致、産業用水素ボイラーの導入支援など）が必要
- ローカル（蓄エネ）水素利用のためのエネルギーキャリア（水素の輸送・貯蔵技術）の選択
  - 中期的には（水素利用の初期段階）、既存の都市ガスインフラを利用できるメタンが有望となり得ること、長期的には（後期段階）、高圧水素をはじめに液化水素やアンモニアなどが有望となり得ることを念頭に、水素貯蔵・輸送インフラの構築の検討が必要

5-2. 環境政策等への貢献

＜行政等が既に活用した成果＞

- **再生可能エネルギー部門拡張産業連関表（REFIO）**は、国内再エネ由来の水素利用に関する環境省事業において、**再エネ由来水素の導入による地域経済効果の分析**に利用

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

- 本研究で開発された、環境・経済両面から分析可能なREFIO、ならびに、地方雇用効果を組み込んだ多地域MARKALは、**地域循環共生圏（第五次環境基本計画、2018年4月）**の実現に向け、地域の再エネ資源を有効活用して脱炭素と地方創生を両立しうる再エネ導入政策の立案に必要な定量情報を提供するツールとして活用
- 本研究で得られた再エネ導入に伴う雇用機会の創出や雇用シフトに関する分析方法・結果は、**パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略（2019年6月）**が指摘している脱炭素社会に向けた「労働力の公正な移行」を踏まえた地域再エネ政策の立案に寄与
- 本研究で提示した、再エネ直接熱利用技術や海洋エネルギーの費用対効果の高い導入のあり方は、**地域脱炭素ロードマップ（2021年6月）**が強調している今後5年間に集中して行う取組・施策の立案に必要な定量情報を提供
- また、2050年の再エネ大量導入社会を見据えた場合、地方部の雇用の潜在的な価値を考えることによって、国内再エネ由来水素の導入拡大が進む可能性を本研究は指摘しており、水素を利用した脱炭素先行地域の検討にも貢献

5-3. 研究目標の達成状況（本研究のまとめ）

サブテーマ１と２のいずれもが「**目標通りの成果をあげ**」、**研究課題全体**としても将来の再エネ大量普及社会の構築に向けた潜在的な道筋を示すという「**目標通りの成果をあげた**」。

- サブテーマ１と２の密接な連携のもとで、中長期的に、再エネ導入がもたらす雇用機会の創出というコベネフィットの考慮が、地域再エネの導入拡大を後押しする可能性を定量的に明らかにした。
- それと共に、中期的には、地域再エネの導入加速に向け、雇用の円滑な産業間シフトや地元産業の育成などの支援に役立つ定量情報を示した。
- **これまで指摘されてきた再エネ技術のコスト低減だけではなく、地域の公共的価値に着目して、将来の再エネ大量普及社会の構築に向けた道筋を描くという新たな可能性を提示した。**

- サブテーマ1と2では、再エネを利用した直接熱利用技術と海洋再エネ技術に着目して、CO_2削減オプションとしての可能性を定量的に明らかにした。
- 直接熱利用技術（給湯）は費用対効果に優れ、CO_2削減オプションとして有望であること、そして、地域の自然・社会条件を考慮して効果的に導入を進めるべきということを定量的に示した。
- 両技術に共通して、地域資源（中山間地域等の木質バイオマス、島嶼地域等の海洋深層水）を用いた、効果的な地域エネルギーシステムのあり方を具体かつ定量的に提示した。
- **発電だけではなく直接熱利用や海洋エネの可能性を明らかにし、さらに、それらを単体の技術として導入するだけではなく、地域の核となるインフラとして整備するという潜在的な道筋を提示した。**

6. 研究成果の発表状況

査読付き論文	4件
その他誌上発表（査読なし）	1件
口頭発表（学会等）	19件
ポスター発表（学会等）	9件
「国民との科学・技術対話」の実施	1件
マスコミ等への公表・報道等	1件
本研究に関連する受賞	6件

Energy
日本エネルギー学会誌

Grand Renewable Energy
Sustainable Development of Energy, Water and Environmental System
日本エネルギー学会
日本LCA学会
令和元年度 環境研究総合推進費 研究成果発表会
日本高圧技術協会
産業技術総合研究所E&Eフォーラム

エコプロ2019「将来における再生可能エネルギーの賢い使い方を考える」
横浜国立大学のSDGsホームページから、本研究プロジェクトを日英両言語で発信

日本エネルギー学会　論文賞　1件
Grand Renewable Energy 2018　ポスター賞 1件
国内学会等（日本エネルギー学会等）ポスター賞　4件